

# 节能服务公司利益最大化视角的 EPC 合同参数决策模型

高欣<sup>1</sup>, 阮红权<sup>1</sup>, 薛文娟<sup>2</sup>, 王云龙<sup>3</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 上海电力学院 数理学院, 上海 200090;  
3. 上海理工大学 理学院, 上海 200093)

**摘要:** 基于预期利润净现值达到一定阈值用能单位就会同意合同能源管理(EPC)合同的假设,从节能服务公司(ESCO)利益最大化视角构建了一个 EPC 合同参数决策模型.对 179 个 EPC 样本的合同信息进行统计,分析融资、ESCO 注册资本等因素对合同参数和节能绩效的影响.结果表明:融资和 ESCO 注册资本对合同参数和节能绩效有显著的正向影响.该结果与融资困难是现阶段 EPC 发展障碍之一的事实相符,验证了所提出模型的有效性.

**关键词:** 合同能源管理(EPC); 合同参数决策; 年节能效益; 融资

中图分类号: TE08

文献标志码: A

## Contract Parameter Decision Model of Energy Performance Contracting from Perspective of Interest Maximization of ESCo

GAO Xin<sup>1</sup>, RUAN Hongquan<sup>1</sup>, XUE Wenjuan<sup>2</sup>, WANG Yunlong<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Mathematics and Physics, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 3. College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Assuming that the energy consumption unit is willing to agree to the contract for energy performance contracting (EPC) when the expected net present value of profit is equal or greater than the threshold value, a contract parameter decision model of EPC is developed from the point of profit maximization of energy service company (ESCO). The effects of financing, registered capital and other factors on the contract parameter and energy-saving performance are explored based on the statistical analysis of 179 EPC

contracts. The analytic results demonstrate that the financing and the registered capital of ESCo have significant positive effects on the contract parameter and energy-saving performance. It is consistent with the fact that the financing difficulty is one of the present obstacles to the development of EPC, indicating that the proposed method is feasible.

**Key words:** energy performance contracting (EPC); contract parameter decision; annual cost saving; financing

我国合同能源管理(EPC)市场潜力巨大<sup>[1-2]</sup>. 2010年,国家发展改革委等部门联合出台了推动EPC发展的里程碑式文件《关于加快推行合同能源管理促进节能服务产业发展的意见》,对EPC发展给予了前所未有的政策支持.同年,第1个涉及EPC项目合同规范的文件《合同能源管理技术通则》发布.该通则发布后EPC实现了较快发展,产业总产值从2010年的836亿元增长到2017年的4148亿元.然而,项目投资增速却从2011年的43.5%下降到了2017年的3.7%,考虑到节能减排的广阔市场空间以及政策支持力度的不断加大,对EPC的投资显然是遇到了瓶颈.除了现有研究比较关注的风险因素<sup>[3-4]</sup>、市场信用因素<sup>[5-7]</sup>之外,融资难成了EPC发展的一大障碍<sup>[8-9]</sup>,而且当项目所需的改造投资越高时获得融资的困难通常也越大<sup>[10]</sup>.

EPC是一种源于工业发达国家的市场化节能机制,我国在引进这种机制后采取了自上而下的方式进行推广<sup>[11]</sup>,至2017年底节能服务公司(ESCO)数量达到6137家之多.进入“使市场在资源配置中起决定性作用”的新时期后,ESCO面临的竞争压力日

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(11601318)

第一作者: 高欣(1965—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为建设工程管理及建筑安全管理.

E-mail: gaixin@tongji.edu.cn

益增加. 于风光等<sup>[12]</sup>从 ESCo 的投标竞争力出发, 在 ESCo 合同期内总利润差趋于零时求解 ESCo 的承诺节约成本以及超额分享比例. Deng 等<sup>[13-14]</sup>以 ESCo 的利润净现值非负作为约束条件, 构建了合同期和改造投资的决策模型. 这些研究的本质在于以用能单位利益最大化为出发点研究 EPC 项目的合同参数.

本文引入新的条件指标——用能单位预期的最小利润  $c$ , 构建一个合同参数(本文指合同期、改造投资、改造投资分摊比例)决策模型. 然后, 对 EPC 样本的合同信息进行统计, 分析融资、注册资本、财政奖励或税收优惠以及行业对合同参数和节能绩效的影响.

## 1 ESCo 利益最大化视角的合同参数决策模型

### 1.1 模型假设

对用能单位来说, 愿意采用 EPC 机制是因为他们面临较大的节能环保压力. 节能效益不是用能单位的主要收入来源, 如果 ESCo 能够保证用能单位取得一定节能效益, 用能单位就愿意将项目委托给 ESCo. 据此做出假设 1: 只要预期的利润净现值达到一定阈值, 用能单位就会同意签订 EPC 合同.

ESCo 是“节能服务专家”, 收入来自节能效益分享. 彭鸿广等<sup>[15]</sup>认为 EPC 项目中用能单位是风险规避的而 ESCo 是风险中性的. 可以推断, 如果节能效益分享比例与改造投资分摊比例成正相关, 只要收益净现值超过改造投资, ESCo 就倾向于提供改造投资的较大份额. 事实上, 节能效益分享比例的确定是一个复杂问题, 也是 EPC 机制的重要组成部分. 节能效益分享比例不但受改造投资分摊比例的影响, 也与项目特点、合同期、改造投资以及合同双方的风险承受能力等因素密切相关. 卢志坚等<sup>[16]</sup>建立了完全信息下的 EPC 节能效益分享博弈模型, 发现低能耗或低能源价格的用户选择较高的节能效益分享比例, 而高能耗或高能源价格的用户选择较低的节能效益分享比例. 本文采用的 179 个有效样本(见第 1.3 节)中, 有 169 个样本由 ESCo 负责全部投资或融资, ESCo 的收益分享比例分布于区间  $[0, 1, 1.0]$ . 观察这些样本可以发现, 可能是由于 EPC 买方市场的特点, 节能效益分享比例的确定尚不存在统一标准. 为了不使本文探讨的合同参数决策模型过于复杂, 做出假设 2: 节能效益分享比例与改造投资分摊

比例相同. 在很多情况下 ESCo 的节能效益分享比例小于其改造投资分摊比例. 考虑到 EPC 合同参数依赖于均衡条件下双方博弈的结果, 因此基于分享比例边界情形的这一假设具有一定的合理性.

EPC 项目的设计、采购、施工周期较短, 运行维护对项目成功至关重要. 为了不使所研究的合同参数决策模型过于复杂, 做出假设 3: 能效设施是不发生运行和维护成本的.

最后, 做出假设 4: 双方的资金折现率在项目全生命周期内是固定的.

### 1.2 合同双方的利润净现值

在 EPC 机制中, 改造投资  $I$ 、ESCo 的改造投资分摊比例  $P$ 、合同期  $T$ 、项目寿命期  $T_L$  的确定直接影响双方收益. 假设 ESCo 的利润净现值为  $A$ , 资金折现率为  $r_E$ , 项目的年节能效益为  $S$ , 则 ESCo 的利润净现值可以表示为

$$A = \sum_{t=1}^T \left( \frac{1}{1+r_E} \right)^t PS - PI \quad (1)$$

合同期满后, 用能单位独享项目资产和全部节能效益. 假设资金折现率为  $r_Y$ , 则用能单位的利润净现值

$$B = \sum_{t=1}^T \left( \frac{1}{1+r_Y} \right)^t (1-P)S + \sum_{t=T+1}^{T_L} \left( \frac{1}{1+r_Y} \right)^t S - (1-P)I \quad (2)$$

### 1.3 基于线性回归确定年节能效益

采用中国节能协会节能服务产业委员会对 2011—2016 年投入运行的 221 个 EPC 项目的合同信息, 提取它们的 9 项指标: 行业、合同双方注册资本、改造投资、改造投资分摊比例(含是否融资)、节能效益分享比例、年节能量、年节能效益、合同期、有无财政奖励或税收优惠. 使用线性回归方法得到这些 EPC 项目的改造投资—年节能效益关系. 其中, 具备改造投资和年节能效益数据的样本有 206 个, 图 1 是这些样本的单位投资年节能效益气泡图. 气泡代表单位投资的年节能效益. 从图 1 发现, 较大的气泡集中在改造投资较小的区域, 说明 EPC 项目可能存在规模不经济现象.

将样本按行业分类后使用 SPSS22.0 软件生成这些行业的箱线图, 剔除 27 个异常值后归并为 5 个行业: ①冶金行业; ②化工、煤炭、建材行业; ③电力行业; ④机械制造、信息与通信、轻工行业; ⑤建筑、公共设施行业.

对于变量间的非线性关系可通过变量变换转化为线性关系, 并可最终通过线性回归分析建立线性

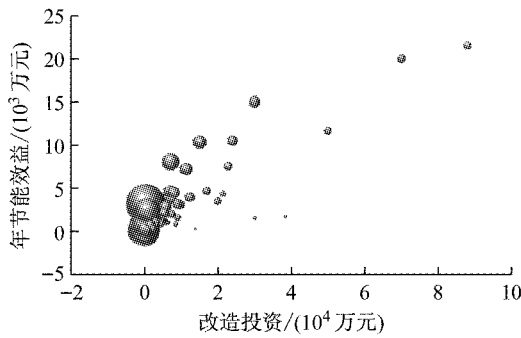


图 1 样本的改造投资-年节能效益气泡图

Fig.1 Bubble chart of revamping cost in terms of annual cost saving for examples

表 1 改造投资-年节能效益曲线估计结果

Tab.1 Results of revamping cost in terms of annual cost saving in curve estimation

方程	模型汇总				参数估计值						
	$R^2$	$R_a^2$	F	Sig.	常数	$b_1$	标准化 $b_1$	$b_2$	标准化 $b_2$	$b_3$	标准化 $b_3$
线性	0.496	0.493	141.725	0	328.866	0.202	0.704				
对数	0.419	0.415	103.746	0	-2 444.900	498.094	0.647				
二次	0.700	0.696	166.794	0	30.942	0.554	1.927	0	-1.303		
三次	0.710	0.704	115.986	0	101.008	0.437	1.521	0	-0.063	0	-0.877
幂	0.755	0.753	444.204	0	3.008	0.748	0.869				

函数关系,拟合函数符合凹函数的性质,即年节能效益随改造投资的增加而增加,但边际增量逐渐减小。

### 1.4 合同参数决策模型

用  $c$  表示用能单位预期的最小利润净现值,则 ESCo 利益最大化视角的合同参数决策模型可以归结为以下非线性规划问题:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max A = \frac{3I^{0.75}P}{r_E}(1 - (1 + r_E)^{-T}) - PI \\ \text{s. t. } g_1 = B - c = \\ \quad \frac{3I^{0.75}(1 - P)}{r_Y}(1 - (1 + r_Y)^{-T}) + \\ \quad \frac{3I^{0.75}}{r_Y}((1 + r_Y)^{-T} - (1 + r_Y)^{-T_L}) - (4) \\ \quad (1 - P)I - c \geq 0 \\ g_2 = T \geq 0 \\ g_3 = P \geq 0 \\ g_4 = 1 - P \geq 0 \\ g_5 = I \geq 0 \end{array} \right.$$

## 2 模型求解与分析

### 2.1 K-K-T 方法求解

采用 K-K-T 方法求解式(4),其拉格朗日函数为

模型<sup>[17]</sup>. 变量间的这种非线性关系称为本质线性关系. SPSS22.0 软件中的本质线性模型有很多,常见的有二次曲线、复合曲线、增长曲线、对数曲线、S 曲线、指数曲线、逆函数、三次曲线、幂函数、逻辑函数. 对这 179 个有效样本进行建模,表 1 为判定系数  $R^2$  值和调整的判定系数  $R_a^2$  值较大的模型结果(检验采用  $F$  统计量, Sig. 表示显著性,  $b_1 \sim b_3$  表示解释变量对应的系数, 标准化  $b_1 \sim$  标准化  $b_3$  表示样本数据标准化后解释变量对应的系数).

年节能效益的回归模型近似表示为

$$S = 3I^{0.75} \quad (3)$$

式(3)表明, EPC 项目的改造投资与年节能效益成幂

$$L(T, I, P, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) = A - \lambda_1 g_1 - \lambda_2 g_2 - \lambda_3 g_3 - \lambda_4 g_4 - \lambda_5 g_5 \quad (5)$$

式中:  $\lambda_1 \sim \lambda_5$  表示拉格朗日乘子.

由于  $I, P$  和  $T$  不可能为零, 根据互补松弛约束条件, 可得  $\lambda_2 = 0, \lambda_3 = 0, \lambda_5 = 0$ , 则拉格朗日公式可简化为

$$L(T, I, P, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5) = A - \lambda_1 g_1 - \lambda_4 g_4 = A - \lambda_1(B - c) - \lambda_4(1 - P) \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial I} = \frac{9I^{-0.25}}{4r_E r_Y} (Pr_Y - Pr_Y(1 + r_E)^{-T} - \frac{4}{9}I^{0.25}Pr_E r_Y - \lambda_1 r_E(1 - P)(1 + r_Y)^{-T} + \lambda_1 r_E(1 + r_Y)^{-T_L} - \lambda_1 r_E \frac{4}{3}T_L(1 + r_Y)^{-T_L} \ln(1 + r_Y) + \frac{4}{9}I^{0.25}\lambda_1 r_E r_Y - \frac{4}{9}I^{0.25}\lambda_1 r_E r_Y P) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P} = \frac{1}{r_E r_Y} (3I^{0.75}r_Y - 3I^{0.75}r_Y(1 + r_E)^{-T} - Ir_E r_Y - 3I^{0.75}\lambda_1 r_E + 3I^{0.75}\lambda_1 r_E(1 + r_Y)^{-T} - \lambda_1 r_E r_Y I + \lambda_4 r_E r_Y) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial T} = \frac{3I^{0.75}P}{r_E r_Y} (r_Y(1 + r_E)^{-T} \ln(1 + r_E) - \lambda_1 r_E(1 + r_Y)^{-T} \ln(1 + r_Y)) = 0 \quad (9)$$

因此, 式(4)表示的非线性规划问题无显式解.

### 2.2 双方资金折现率的关系

式(9)的解为

$$T = \frac{\ln\left(\frac{1}{\lambda_1} \frac{r_Y \ln(1+r_E)}{r_E \ln(1+r_Y)}\right)}{\ln(1+r_E) - \ln(1+r_Y)} \quad (10)$$

当改造投资的  $r_E=r_Y$  时,可以得到以下结论:

(1)  $T$  在数学意义上趋于无穷大,  $ESCo$  和用能单位不会成功签订合同.

(2) 把  $r_E=r_Y$  代入拉格朗日公式中,式(9)变为

$$\frac{\partial L}{\partial T} = (1-\lambda_1) \frac{3I^{0.75} P(1+r_E)^{-T} \ln(1+r_E)}{r_E} = 0 \quad (11)$$

当  $I=0$  或  $P=0$  时式(11)成立,此时双方同样不会成功签订合同. 当  $\lambda_1=1$  时式(11)成立,但这只是一个特例.

### 2.3 模型的优化处理

注意到式(4)表示的优化模型无显式解,所以只能寻求数值解法. Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数只能求解连续优化模型,并且求得的解只是局部最优解. 本文尝试采用 fmincon 函数求解式(4),结果显示算法因迭代步长过小而失败,虽然通过选择合适的初始点使其迭代成功,但是所获得的解仍然不符合事实.

式(4)表示的合同参数决策模型可以归结为一个非线性整数规划问题,如下所示:

$$\begin{cases} \max A = \frac{3PI^{0.75}}{r_E} (1 - (1+r_E)^{-T}) - PI \\ \text{s. t. } B = \frac{3(1-P)I^{0.75}}{r_Y} (1 - (1+r_Y)^{-T}) + \\ \quad \frac{3I^{0.75}}{r_Y} ((1+r_Y)^{-T} - (1+r_Y)^{-T_L}) - \\ \quad (1-P)I = c \\ 2 \leq T_L \leq 25, \quad T_L \text{ 为整数} \\ 2 \leq T \leq T_L - 1, \quad T \text{ 为整数} \\ 0 \leq P \leq 1 \\ I \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中,对  $B$  的约束由式(4)的  $B-c \geq 0$  改为  $B=c$  是因为在最优解处该约束为积极约束.

对式(12)表示的最优化问题,还没有很好的求解全局解的办法. 因为  $T$  和  $T_L$  都是不太大的整数,对两者进行枚举(共 276 次)可求解式(12). 为方便起见,记  $\alpha_1 = \frac{3}{r_E} \left(1 - \frac{1}{(1+r_E)^T}\right)$ ,  $I = u^4$ ,  $\beta_1 = \frac{3}{r_Y} \left(1 - \frac{1}{(1+r_Y)^T}\right)$ ,  $\beta_2 = \frac{3}{r_Y} \left(\frac{1}{(1+r_Y)^T} - \frac{1}{(1+r_Y)^{T_L}}\right)$ , 得  $A = P(u^3 \alpha_1 - u^4) = Pu^3(\alpha_1 - u)$ . 令  $\tilde{B} = B - c = \beta_1(1-P)u^3 + \beta_2 u^3 - (1-P)u^4 - c$ , 对于固定值的  $T$

和  $T_L$ , 求解式(12)转化为求解优化子问题,如下所示:

$$\begin{cases} \max A \\ \text{s. t. } \tilde{B} = 0 \\ 0 \leq P \leq 1 \\ u \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

若  $P=1$ , 则  $\beta_2 u^3 - c = 0$ . 于是,最优解  $u_0 = \sqrt[3]{\frac{c}{\beta_2}}$ , 记对应最优值为  $f_0$ .

若  $0 \leq P < 1$ , 则  $1-P = 1 - \frac{c - \beta_2 u^3}{\beta_1 u^3 - u^4}$ . 定义  $D = \frac{c - \beta_2 u^3}{\beta_1 u^3 - u^4}$ , 则  $D \in [0, 1)$ . 记  $\bar{u}_{\min} = \min\left(\sqrt[3]{\frac{c}{\beta_2}}, \beta_1\right)$ ,

$\bar{u}_{\max} = \max\left(\sqrt[3]{\frac{c}{\beta_2}}, \beta_1\right)$ . 令  $G(u) = u^4 - (\beta_1 + \beta_2)u^3 + c$ , 则  $G(u)$  为关于  $u$  的四次多项式,在复数域内有 4 个根. 若为复根则成对出现,因而有 2 个实根或有 4 个实根. 若  $G(u)=0$  有 4 个实根,设为  $h_1, h_2, h_3, h_4$ , 则  $G(u)$  在  $(h_1, h_2) \cup (h_3, h_4)$  小于 0, 在  $(-\infty, h_1) \cup (h_2, h_3) \cup (h_4, +\infty)$  大于 0. 若  $G(u)=0$  有 2 个实根,设为  $h_1, h_2$ , 则  $G(u)$  在  $(h_1, h_2)$  小于 0, 在  $(-\infty, h_1) \cup (h_2, +\infty)$  大于 0.

(1) 若  $\beta_1 u^3 - u^4 > 0, c - \beta_2 u^3 \geq 0$

此时  $u \leq \bar{u}_{\min}$ , 由  $D \in [0, 1)$  推出  $u^4 - (\beta_1 + \beta_2)u^3 + c < 0$ .

若  $h_1, h_2, h_3, h_4$  为  $u^4 - (\beta_1 + \beta_2)u^3 + c = 0$  的 4 个实根,则优化子问题式(13)转化为一维连续优化问题,如下所示:

$$\begin{cases} \max A = \frac{(\beta_1 + \beta_2)u^3 - u^4 - c}{\beta_1 - u} (\alpha_1 - u) \\ \text{s. t. } u \in (h_1, h_2) \cup (h_3, h_4) \\ 0 \leq u \leq \bar{u}_{\min} \end{cases} \quad (14)$$

设上述一维连续优化问题的最优解为  $u_1$ , 记对应最优值为  $f_1$ .

若  $h_1, h_2$  为  $u^4 - (\beta_1 + \beta_2)u^3 + c = 0$  的 2 个实根,则式(13)转化为一维连续优化问题,如下所示:

$$\begin{cases} \max A = \frac{(\beta_1 + \beta_2)u^3 - u^4 - c}{\beta_1 - u} (\alpha_1 - u) \\ \text{s. t. } u \in (u_1, u_2) \\ 0 \leq u \leq \bar{u}_{\min} \end{cases} \quad (15)$$

设上述一维连续优化问题的最优解为  $u_1$ , 记对应最优值为  $f_1$ .

(2) 若  $\beta_1 u^3 - u^4 < 0, c - \beta_2 u^3 < 0$

此时  $u \geq \bar{u}_{\max}$ , 由  $D \in [0, 1)$  推出  $u^4 - (\beta_1 + \beta_2)u^3 + c > 0$ .

若  $h_1, h_2, h_3, h_4$  为  $u^4 - (\beta_1 + \beta_2)u^3 + c = 0$  的 4 个实根, 则式 (13) 转化为一维连续优化问题, 如下所示:

$$\begin{cases} \max A = \frac{(\beta_1 + \beta_2)u^3 - u^4 - c}{\beta_1 - u}(\alpha_1 - u) \\ \text{s. t. } u \in (-\infty, h_1) \cup (h_2, h_3) \cup (h_4, +\infty) \\ u \geq \bar{u}_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

设上述一维连续优化问题最优解为  $u_2$ , 记对应最优值为  $f_2$ .

若  $h_1, h_2$  为  $u^4 - (\beta_1 + \beta_2)u^3 + c = 0$  的 2 个实根, 则式 (13) 转化为一维连续优化问题, 如下所示:

$$\begin{cases} \max A = \frac{(\beta_1 + \beta_2)u^3 - u^4 - c}{\beta_1 - u}(\alpha_1 - u) \\ \text{s. t. } u \in (0, h_1) \cup (h_2, +\infty) \\ u \geq \bar{u}_{\max} \end{cases} \quad (17)$$

设上述一维连续优化问题最优解为  $u_2$ , 记对应最优值为  $f_2$ .

综合  $P=1, 0 \leq P < 1$  这 2 种情况, 给定  $T$  和  $T_L$ , 式 (13) 的最优解为  $u_{i_0}$ , 对应最优值  $f_{i_0} = \max_{0 \leq i \leq 2} f_i$ . 此时

$$I = u_{i_0}^4, \quad F = \begin{cases} 1, & i_0 = 0 \\ \frac{(\beta_1 + \beta_2)u_{i_0}^3 - u_{i_0}^4 - c}{\beta_1 u_{i_0}^3 - u_{i_0}^4}, & i_0 = \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

### 2.4 最优解的数值解分析

式 (12) 表示的合同参数决策模型中合同参数 (即决策变量) 是  $T, I$  和  $P$ , 外生变量是  $r_E, r_Y$  和  $c$ . 改变  $r_E, r_Y$  和  $c$  的值 (假设  $r_E = 0.11, r_Y = 0.08, c = 50$  万元), 分析它们的变化对合同参数的影响, 同时也考察它们的变化对  $A, B$  以及项目的年节能效益  $S$  的影响. 年节能效益

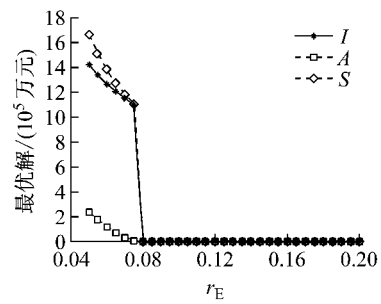
$$S = A + B + I \quad (19)$$

#### (1) $r_E$ 的影响

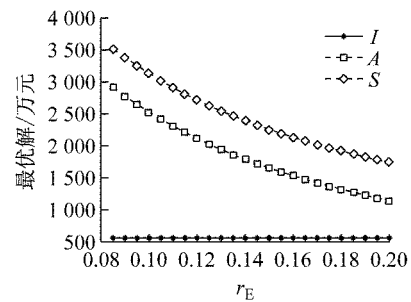
图 2 表示  $r_E$  对  $I, A$  和  $S$  的影响 (此时  $r_Y$  和  $c$  都不变). 当  $r_E = r_Y$  时 (此时  $r_E = 0.08$ , 由第 2.2 节分析可知, 这种情况下双方基本不能够成功签订合同),  $I, A$  和  $S$  的图形均发生了跳跃. 其他情况下,  $A$  和  $S$  都随  $r_E$  的增大而减小. 由于边际年节能效益递减,  $ESCo$  减小  $I$  有利于取得理想的年节能效益, 因此  $I$  也是变小的, 但当  $r_E > 0.08$  时, 为满足  $c$  的要求  $I$  保持不变.

#### (2) $r_Y$ 的影响

图 3 表示用能单位的资金折现率  $r_Y$  对  $I, A$  和



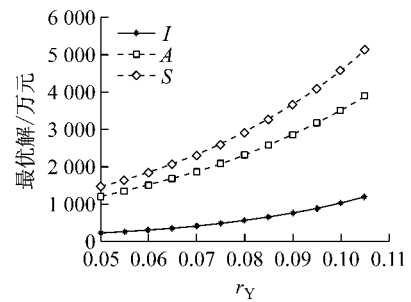
a  $r_E$  为 0.050~0.200



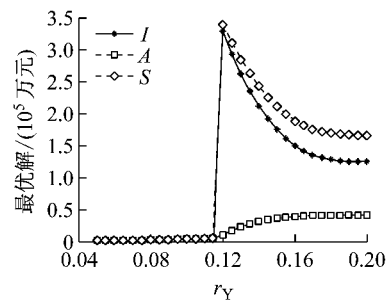
b  $r_E$  为 0.080~0.200

图 2  $r_E$  对  $I, A, S$  的影响

Fig.2 Effect of  $r_E$  on  $I, A$  and  $S$



a  $r_Y$  为 0.050~0.105



b  $r_Y$  为 0.050~0.200

图 3  $r_Y$  对  $I, A, S$  的影响

Fig.3 Effect of  $r_Y$  on  $I, A$  and  $S$

$S$  的影响 (此时  $r_E$  和  $c$  都不变). 由图 3 可知,  $r_Y = r_E$  时,  $I, A$  和  $S$  的图形均发生了跳跃.  $r_Y < r_E$  时,  $I, A$  和  $S$  都随  $r_Y$  的提高而增大, 因为根据式 (12)  $I$  应该相应增大才能满足  $c$  的要求, 此时  $A$  和  $S$  随  $I$  的增大而增大.  $r_Y > r_E$  时, 为满足  $c$  的要求项目必须有最小的  $I$ , 所以  $I, A$  和  $S$  都趋于保持不变.

#### (3) $c$ 的影响

如图 4 所示,为了满足用能单位预期的最小利润  $c$  的要求,随着  $c$  变大需要  $I$  增大从而使  $S$  增大,并引起  $A$  相应增大. 式(12)表示的决策模型中有 3 个外生变量,基于  $c=50$  万元的假设分析了  $r_E, r_Y$  的影响(同理,基于  $r_E$  是一个定值的假设分析了  $c, r_Y$  的影响). 从图 4 看出,  $c$  在 50 万元附近连续变化的过程中  $I, A, S$  也相应连续变化. 这说明  $c$  的取值的微小变化不会引起最优解的剧烈变化. 因此,本文的结论关于  $c$  具有一定稳健性.

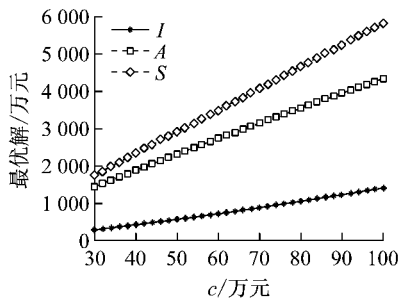


图 4  $c$  对  $I, A, S$  的影响

Fig.4 Effect of  $c$  on  $I, A$  and  $S$

(4) 对  $P$  的影响

$c, r_E$  和  $r_Y$  的不同取值情况下,  $P$  总是趋于 1, 即 ESCo 倾向于提供改造投资的较大份额. 图 5 表示  $r_E$  对  $P$  的影响.  $c$  和  $r_Y$  对  $P$  的影响也类似.

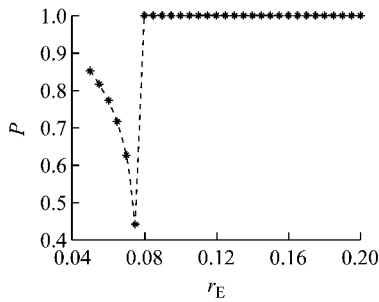


图 5  $r_E$  对  $P$  的影响

Fig.5 Effect of  $r_E$  on  $P$

(5) 对  $T$  的影响

$c, r_E$  和  $r_Y$  不同取值的情况下,  $T$  均等于 24 年. 这表明, ESCo 将签订尽可能长的合同期以最大化  $A$  而不受资金折现率的影响.

### 3 合同参数影响因素的统计分析

#### 3.1 多元线性回归模型

$T, I$  和  $P$  是合同参数决策模型的决策变量, 因此多元线性回归模型的被解释变量包括  $\ln T$  和  $\ln I$ . 另外, 为分析节能绩效的影响因素, 还选择被解

释变量  $\ln Q$  和  $\ln S$ , 其中  $Q$  表示年节能量. 模型的解释变量为  $\ln R_E, \ln R_Y, V, J, C_h, E_1, M_a, B_u$ , 其中  $R_E$  表示 ESCo 注册资本,  $R_Y$  表示用能单位注册资本,  $C_h$  表示化工、煤炭、建材行业,  $E_1$  表示电力行业,  $M_a$  表示机械制造、电子信息与通信、轻工行业,  $B_u$  表示建筑、公共设施行业,  $V$  表示是否融资,  $J$  表示有无财政奖励或税收优惠. 179 个有效样本的多元线性回归模型可以表示为

$$\ln T = 3.087 + 0.101 \ln R_E - 0.016 \ln R_Y + 0.202 C_h - 0.144 E_1 - 0.033 M_a - 0.530 B_u + 0.289 V + 0.146 J \quad (20)$$

$$\ln I = 4.558 + 0.479 \ln R_E - 0.017 \ln R_Y - 0.233 C_h - 0.455 E_1 - 1.094 M_a - 0.471 B_u + 1.549 V + 0.133 J \quad (21)$$

$$\ln Q = 7.018 + 0.324 \ln R_E - 0.015 \ln R_Y - 0.430 C_h - 0.216 E_1 - 1.114 M_a - 1.342 B_u + 1.223 V + 0.009 J \quad (22)$$

$$\ln S = 5.323 + 0.274 \ln R_E + 0.008 \ln R_Y - 0.295 C_h - 0.746 E_1 - 0.883 M_a - 0.973 B_u + 1.304 V + 0.187 J \quad (23)$$

#### 3.2 影响因素分析

##### (1) 是否融资的影响

有融资的项目相比无融资的项目合同期平均增加 34%, 即  $(e^{0.289} - 1) \times 100\% = 34\%$ , 改造投资平均提高 371%, 年节能量平均增加 240%, 年节能效益平均增加 268%. 因此, ESCo 能够获得低成本的资金(即较低的资金折现率)非常重要, 这与第 2.4 节的分析一致.

##### (2) 注册资本的影响

ESCo 的注册资本增加 1%, 合同期将增加 0.101%, 改造投资将提高 0.497%, 年节能量将增加 0.324%, 年节能效益将增加 0.274%. 第 2.4 节中已分析出 ESCo 倾向于提供改造投资的较大份额, 而 ESCo 的注册资本与其能使用的项目改造资金通常是正相关的, 因此注册资本就影响了合同参数和节能绩效.

用能单位注册资本的影响不显著. 一方面是因为大部分样本的改造投资来自 ESCo 或由 ESCo 融资; 另一方面是因为用能单位注册资本差异比较大, 即使改造投资来自用能单位, 注册资本与合同参数、节能绩效的相关性也很小.

##### (3) 有无财政奖励或税收优惠的影响

财政奖励或税收优惠的影响不显著. 因为这类激励通常在项目实施的中后期才能享受到, 对签订

EPC 合同无直接影响。

#### (4) 行业的影响

统计意义上的合同期依次为化工、煤炭、建材行业>冶金行业>机械制造、电子信息与通信、轻工行业>电力行业>建筑、公共设施行业。平均投资依次为冶金行业>化工、煤炭、建材行业>电力行业>建筑、公共设施行业>机械制造、电子信息与通信、轻工行业。平均年节能量依次为冶金行业>电力行业>化工、煤炭、建材行业>机械制造、电子信息与通信、轻工行业>建筑、公共设施行业。平均年节能效益依次为冶金行业>化工、煤炭、建材行业>电力行业>机械制造、电子信息与通信、轻工行业>建筑、公共设施行业。

## 4 研究结论和政策意义

本文 ESCo 利益最大化视角的合同参数决策模型可以解释当 ESCo 的资金折现率降低时 EPC 项目的改造投资增加、总节能效益增加、ESCo 的利润净现值变大的原因。

统计分析证明了有融资的项目相比无融资的项目合同期更长、改造投资更大、年节能量和年节能效益更多。ESCo 的注册资本对合同期、改造投资、年节能量和年节能效益有显著影响,而财政奖励或税收优惠对这些合同参数和节能绩效无显著影响。

综上,向 ESCo 提供低成本的资金是非常重要的。财政奖励或税收优惠只有在项目的中后期才能获得,对 EPC 项目的合同签订是无效的。因此,政府对 EPC 产业的支持应着力提供良好的融资环境。

## 5 结语

融资困难是现阶段 EPC 发展的障碍之一。现有研究主要从 ESCo 的投标竞争力出发研究改造投资、超额分享比例、合同期,均属于用能单位利益最大化视角的合同参数决策模型,没有统筹考虑 ESCo 的融资能力。实际上,ESCo 无法获得低成本的资金将直接影响产业发展。本文研究得出的结论具有较强的参考意义,尤其对 EPC 产业尚需进一步发展的国家具有借鉴意义。以我国为例,虽然 EPC 市场潜力巨大,政策推动力度也较大,但大多新成立的 ESCo 资金实力单薄、融资能力差导致了近年来对 EPC 的投资遇到了瓶颈。向 ESCo 提供低成本的资金至关重要,因而政策的制定应该由提供财政奖励

或税收优惠向提供良好的融资环境转变。

#### 参考文献:

- [1] International Finance Corporation. China Energy Service Company (ESCO) market study [EB/OL]. [2018-01-18]. <http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/742aad00401df888898aff23ff966f85/IFC+final+ESCO+report-EN+.pdf?MOD=AJPERES>.
- [2] SHEN B, PRICE L, LIU M, *et al.* White paper: unleashing energy efficiency retrofits through Energy Performance Contracts in China and the United States [EB/OL]. [2017-12-29]. [http://www.globalchange.umd.edu/data/epc/EPC\\_Market\\_Opportunity\\_Paper\\_final0429.pdf](http://www.globalchange.umd.edu/data/epc/EPC_Market_Opportunity_Paper_final0429.pdf).
- [3] HU J R, ZHOU E Y. Engineering risk management planning in Energy Performance Contracting in China [C] // Systems Engineering Procedia, 4th International Conference on Engineering and Risk Management (ERM). Toronto: Elsevier Science, 2011:195-205.
- [4] 吴志炯,董秀成,皮光林. 我国石油化工合同能源管理项目风险评价 [J]. 天然气工业, 2017,37(2): 112. WU Zhijiong, DONG Xiucheng, PI Guanglin. Risk evaluation of China's petrochemical Energy Performance Contracting (EPC) projects: taking the Ningxia Petrochemical Company as an example [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 112.
- [5] KOSTKA G, SHIN K. Energy conservation through energy service companies: empirical analysis from China [J]. Energy Policy, 2013, 52: 748.
- [6] QIAN D, GUO J E. Research on the energy-saving and revenue sharing strategy of ESCOs under the uncertainty of the value of Energy Performance Contracting Projects [J]. Energy Policy, 2014, 73: 710.
- [7] XU P P, CHAN E H W, VISSCHER H J, *et al.* Sustainable building energy efficiency retrofit for hotel buildings using EPC mechanism in China: Analytic Network Process (ANP) approach [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 107: 378.
- [8] 于风光,何海燕. 融资租赁在我国合同能源管理中应用存在的问题研究 [J]. 科技管理研究, 2015, 35: 194. YU Fengguang, HE Haiyan. The existing problems of finance leasing's application in China's Energy Management Contract [J]. Science and Technology Management Research, 2015, 35: 194.
- [9] RUAN H Q, GAO X, MAO C X. Empirical study on annual energy-saving performance of energy performance contracting in China [J]. Sustainability, 2018, 10(5): 1666.
- [10] LI Y. AHP-fuzzy evaluation on financing bottleneck in Energy Performance Contracting in China [C] // Energy Procedia, 2011 2nd International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE). Bangkok: Elsevier Science, 2012: 121-126.
- [11] 中国节能协会节能服务产业委员会(EMCA). 合同能源管理 [M]. 北京: 人民法院出版社, 2012. ESCO Committee of China Energy Conservation Association (EMCA). Energy performance contracting [M]. Beijing: People's Court Press, 2012.

- [12] 于风光,周君,翟春安. 节能量保证型模式下 ESCO 承诺节约成本估算 [J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(2): 36.  
YU Fengguang, ZHOU Jun, ZHAI Chun'an. Strategic design of cost savings guarantee in Energy Performance Contracting [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 33(2): 36.
- [13] DENG Q L, ZHANG L M, CUI Q B, *et al.* A simulation-based decision model for designing contract period in building energy performance contracting [J]. Building and Environment, 2015, 71: 71.
- [14] DENG Q L, JIANG X L, ZHANG L M, *et al.* Making optimal investment decisions for energy service companies under uncertainty: a case study [J]. Energy, 2015, 88: 234.
- [15] 彭鸿广, 骆建文. 信息不对称下节能服务外包合同的设计 [J]. 预测, 2014, 33(6): 60.  
PENG Hongguang, LUO Jianwen. Design of contract in energy service contracting under asymmetric information [J]. Forecasting, 2014, 33(6): 60.
- [16] 卢志坚, 孙元欣. 完全信息下的合同能源管理节能效益分享模式博弈模型 [J]. 科技管理研究, 2015, 35: 216.  
LU Zhijian, SUN Yuanxin. A game for the shared saving model of energy performance contract under perfect information [J]. Science and Technology Management Research, 2015, 35: 216.
- [17] 薛薇. 基于 SPSS 的数据分析 [M]. 3 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.  
XUE Wei. Data analysis based on SPSS [M]. 3rd ed. Beijing: China Renmin University Press, 2014.

(上接第 1561 页)

### 参考文献:

- [1] 杨国伟, 魏宇杰, 赵桂林, 等. 高速列车的关键力学问题 [J]. 力学进展, 2015, 45: 217.  
YANG Guowei, WEI Yujie, ZHAO Guilin, *et al.* Research progress on the mechanics of high speed rails [J]. Advances in Mechanics, 2015, 45: 217.
- [2] THOMPSON D J, IGLESIAS L E, LIU X W, *et al.* Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains [J]. International Journal of Rail Transportation, 2015, 3(3): 119.
- [3] 朱剑月, 景建辉. 高速列车气动噪声的研究与控制 [J]. 国外铁道车辆, 2011, 48(5): 1.  
ZHU Jianyue, JING Jianhui. Research and control of aerodynamic noise in high speed trains [J]. Foreign Rolling Stock, 2011, 48(5): 1.
- [4] FREMION N, VINCENT N, JACOB M, *et al.* Aerodynamic noise radiated by the intercoach spacing and the bogie of a high-speed train [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3): 577.
- [5] NOH H, CHOI S, HONG S, *et al.* Investigation of noise sources in high-speed trains [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2014, 228(3): 307.
- [6] 杜健, 梁建英, 田爱琴. 高速列车受电弓气动噪声特性分析 [J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 935.  
DU Jian, LIANG Jianying, TIAN Aiqin. Analysis of aeroacoustics characteristics for pantograph of high-speed trains [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 935.
- [7] 张亚东, 张继业, 李田, 等. 拖车转向架气动噪声数值研究 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 106.  
ZHANG Yadong, ZHANG Jiye, LI Tian, *et al.* Numerical research on aerodynamic noise of trailer bogie [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 106.
- [8] ZHU J Y, HU Z W, THOMPSON D J. Flow simulation and aerodynamic noise prediction for a high-speed train wheelset [J]. International Journal of Aeroacoustics, 2014, 13(7/8): 533.
- [9] WANG M, FREUND J B, LELE S K. Computational prediction of flow-generated sound [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2006, 38: 483.
- [10] SPALART P R, DECK S, SHUR M L, *et al.* A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities [J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20: 181.
- [11] FFWCS-WILLIAMS J E, HAWKINGS D L. Sound radiation from turbulence and surfaces in arbitrary motion [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1969, 264: 321.
- [12] BRENTNER K S, FARASSAT F. Modelling aerodynamically generated sound of helicopter rotors [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39: 83.
- [13] POWELL A. Theory of vortex sound [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1964, 36(1): 177.
- [14] HOWE M S. Theory of vortex sound [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [15] ZHU J Y. Aerodynamic noise of high-speed train bogies [D]. Southampton: University of Southampton, 2015.
- [16] ZHU J Y, HU Z W, THOMPSON D J. Flow behaviour and aeroacoustic characteristics of a simplified high-speed train bogie [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2016, 230(7): 1642.